

リアルタイム体内線量計の開発

著者	百瀬 元紀
号	51
学位授与番号	3751
URL	http://hdl.handle.net/10097/37419

氏 名	もも せ げん き 百 瀬 元 紀		
授 与 学 位	博士 (工学)		
学 位 授 与 年 月 日	平成19年3月27日		
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 量子エネルギー工学専攻		
学 位 論 文 題 目	リアルタイム体内線量計の開発		
指 導 教 員	東北大学教授 石井 慶造		
論 文 審 査 委 員	主査	東北大学教授 石井 慶造	東北大学教授 山崎 浩道
		東北大学教授 松木 英敏	東北大学教授 伊藤 正敏
			(サイクロトロン・RIセンター)
	東北大学教授 山田 省吾		
	(医学系研究科)		

論文内容要旨

放射線治療は近年、がん治療などにおいてますます重要になってきている。放射線治療は、身体の外から照射する外部照射法と、放射線を身体の内側又は身体の中から照射する小線源治療法に大きく分けられる。照射線量としては正常組織には耐えうる線量があり、過剰照射しないように投与する線量を抑えなければならない。また、安全性を考慮して正常組織に照射する放射線を減らせば、同時に病巣に対する効果も弱まる。しかし、照射位置精度をあげる手段は年々進歩しているが、実際に患部付近に照射されている線量は未だにわからずに治療を行なっている。そのため、患部付近で直接、照射線量を測定できる線量計が必要となる。リアルタイム体内線量計とは、体内に付与される線量を治療中つまり照射中に測定する線量計を示している。現在までに体内線量計としては次の3つの方法が考えられている。本研究で検討されている電磁界の誘電現象を用いた無線方式、有線でデータを取り出す方式、シンチレーション光を用いた方式が考えられている。今後、また新しい方式によってデータを取り出す方式は考えられるが、本研究で検討されている電磁界の誘電現象を用いた無線方式がもっともメリットが大きいと考えられる。有線でデータを取り出す場合と比較した場合、人体からの信号線を引き出す必要がないため、被験者つまり患者への負担が少ない。また、シンチレーション光を用いた場合と異なり、直接、線量計から線量データを取り出すため、人体の厚さといった補正の作業が必要ない。

本研究ではリアルタイム体内線量計の開発として、検出器についての選択を初めに行なった。X線検出器としては半導体検出器の一つである CdTe 検出器を選択した。これは CdTe 検出器が冷却装置を必要とせずに室温動作可能で、かつ X 線に対して高い検出効率を持っていることから、体内線量計の検出器として適している。また、X 線検出器としての条件はリアルタイムに照射線量に比例した応答をすることが求められる。次に CdTe 検出器からの信号を身体の中から外へデータを送る方法として電磁界を媒体にした3つの無線方式を提案した。半導体検出器からの信号を電力とする電池を使用しない無線方式、電池を使用して自動的にデータを送信する方式を通信方式1、誘導結合の RF-ID システムの原理による方式を通信方式2として分類した。通信方式2の誘導結合の RF-ID とは身体の外側の回路から磁界を発生させ、その磁場によって体内に埋め込んだ回路にデータ送信のパワーを与え、そのパワーを用いて身体の外側の回路にデータを送るシステムである。3つの方式を比べると、半導体検出器からの信号を

電力とする電池を使用しない無線方式は、電池がないため線量計は何度も利用可能であり、また体内に埋め込む回路に必要な素子も少なく、最もメリットが大きい。また、通信方式 2. はリアルタイムでの電力供給も行なうので、体内に埋め込んだ回路に比べ供給電力量が大きい場合には電池を必要としないというメリットがある。

線量計の検出器としての CdTe 検出器の評価を行なった。上記で示したように CdTe 検出器の応答はリアルタイムに照射線量に比例することが求められる。CdTe 検出器の応答は I-V コンバータ回路を介して、電圧として CdTe 検出器からの出力を増幅させて測定した。評価にあたり治療用の照射施設として LINAC を使用して 6MeV、15MeV の 2 つのエネルギーを CdTe 検出器に照射した実験で評価を行なった。LINAC からの X 線はパルス照射なので、CdTe 検出器からの出力は照射線量率に比例したパルス数になっていた。この結果から、CdTe 検出器は十分にリアルタイムに照射線量を測定できる検出器であることがわかった。

次にそれぞれの通信方式についての検討を行なった。初めに CdTe 検出器によって発生する電力のみで動作する線量計についての検討を行なった。この方式は 3 つの通信方式の中で最もメリットが大きい。データ通信に使用される磁界が小さいと予測されるため、SQUID 磁束計を受信用の磁界検出器として選択した。この選択から CdTe 検出器からの電力を基にコイルから発生する磁場が SQUID 磁束計の検出コイルに対して、鎖交する磁界強度を Finite Element Method による電磁界シミュレーションによって計算した。その結果、体内に埋め込んだ回路からの距離が 10cm 以上のとき、磁界強度 10^{-14}T 以下として検出されることがわかった。しかし、この磁界強度では SQUID 磁束計自身の熱雑音と同レベルとして測定されるため、データの通信ができない。したがって、この方式による線量計システムは不可能であることが判明した。

通信方式 1. と通信方式 2. とともにデジタル通信であることから、データの搬送波が必要である。そのため、搬送波の周波数の選択について先に行なった。通信は近傍電磁界または電磁波の現象によって信号を伝達できるが、データ通信の間に人体が含まれるため、電磁界での人体への影響が考えられる。人体への影響として考えられる渦電流の影響を考慮することによって通信搬送波の周波数帯を制限できるため、電磁界シミュレーションにおいて、コイルならびに人体を模擬し、人体に生じる渦電流の現象を確認した。その結果、通信搬送波は 100MHz 以下が望ましいと判断した。この結果を受け、次に通信回路に使用した際の影響について、人体を水として模擬した状態で実験的検討を行なった。実験では送信、受信が電磁界現象によって行なわれるため、2 つのコイルを使うことで搬送波による信号の伝達を行なった。さらに搬送波を 100MHz 以下の条件下で、電波法の定める電磁界の強度の使用許容値が大きい ISM 周波数帯である 135kHz、6.78MHz、13.56MHz の 3 つ周波数を選択した。実験結果からは、渦電流の影響はなかったが、各周波数で水の媒体依存性を示す結果で歪みが確認された。そのため、最も歪みが少ない 135kHz 付近を通信方式 1. ならびに通信方式 2. の搬送波として最適であると判断した。

通信方式 1. の模擬回路を作成し、線量計としての動作確認を行なった。デジタル通信の方式として搬送波 100kHz に対し、ASK (Amplitude Shift Keying) 変復調させた。ASK 変調は搬送波 100kHz にたして、1/8、1/16 の周波数に相当する 12.5kbits/sec、6.25kbits/sec の 2 種類によって行なった。また、1 回のデータ形式はプリアンブル信号 40bits、同期ワード信号 16bits、検出器からのデータ 10bits、ハ

ミングコード5bitsの計71bitsにリセット信号19bitsで構成されている。設定された通信状態は133Hz、67Hz のサンプリングレートをもつ測定システムに相当している。しかし、このサンプリングレートではCdTe 検出器からの出力をリアルタイムにサンプリングするには不足している。そのため、積分型 A/D コンバータを用いることでこのサンプリングレートの不足という問題は解決された。CdTe 検出器を LINAC からの X 線を照射し、データの通信を用いた線量測定を行なった。この結果からは積分回路の出力は照射されてきた線量率に対して、比例関係をもった出力であることが確認された。システム全体の結果とこの積分器出力を解析した結果が一致していなかった。十分なアナログ・デジタル変換の分解能が足りていないことから、その不一致の原因は A/D コンバータのモード設定のミスによるものであることが判明した。つまり、この結果が示すことはこのモード設定を修正することで、通信方式 1.による線量計システムは確立されることを示唆した。

続いて通信方式 2.についての実験と検証について行なった。通信方式 2 の原理は誘導結合の RF-ID システムの原理と同様である。RF-ID システムはトランスポンダとリーダによって構成されており、トランスポンダは識別される側の回路、つまり本システムでは体内に埋め込まれた回路に相当し、リーダはデータの読み込む側の回路、つまり身体の外側の回路に相当する。トランスポンダはリーダからの近傍電磁界または電磁波を受けることによって、データを送信することができるため、トランスポンダとリーダによる幾何条件が重要になってくる。この幾何条件はトランスポンダとリーダに含まれるコイルの結合によって示され、その結合を定量的に示す結合係数によって表すことができる。今回は一対一のコイル結合でのシステムの検討を行なった。通信方式 2.を設計していくうえで最も重要なシステムパラメータである 2つのコイル間の結合係数を最適化することで通信方式 2.のデータ通信の状態ならびに供給電力量の最適化につながる。そのため、この結合係数を近似式による計算ならびに実験によって導き、コイルの最適化を行なった。近似式による計算値は実験値によって正当性が示され、この結合係数の観点から、体内に埋め込んだ回路中のコイルを $\Phi 2.0\text{mm}$ とすると、身体の外側のコイルは通信距離 10cm では $\Phi 20\text{cm}$ 、通信距離 20cm では $\Phi 40\text{cm}$ が最適であることがわかった。また、そのときの結合係数は 3.5×10^{-4} 、 1.3×10^{-4} 程度となることが確認された。次に通信方式 2.の利点であるリアルタイムでの供給電力量の評価を行なった。電波法ならびに RF-ID の規定上、使用できる磁界強度の許容値が設定されているため、実験時には供給電力量と同時に近磁界プローブで磁界強度の測定することで許容値の範囲で可能な供給電力量を求めた。その結果、ISO14443 の規定範囲では 2つのコイルの距離が 20cm では 10^{-6}W 程度であることがわかった。最後に、データの通信動作の確認を SPICE シミュレーションによって行なった。通信方式 2.では、RF-ID システムの抵抗性負荷変調ならびに容量性負荷変調の 2つ変調について検討を行なった。結合係数の値を 10^{-4} としたとき、デジタル値 Hi、Low に対応する変化による検波回路の出力は抵抗性負荷変調では 3mV、容量性負荷変調では 5mV の変化となり、通信可能であることを示した。

実用化のための評価を行なった。本研究で設計した回路を基に集積化ならびに低消費電力化させたときの回路として、通信方式 1.と通信方式 2.の消費電力量について評価した。通信方式 1.と通信方式 2.共に定電圧 3V での消費電力はおおよそ 6.6mW 程度必要であった。特に A/D コンバータの消費電力が 3.6mW と消費電力の大きい部分である。通信方式 2.は ISO14443 の規定において、リアルタイムによって供給できる電力量は 10^{-6}W なので、電池が必要となることがわかった。また、電池は 6.6mW 程度

必要となり、放射線治療では一回の照射では約 10 分、治療期間ではこの照射を約 5 回行なうことから、最低でも 6.6mW を 10 分以上供給できる電池が求められる。また、体内線量計の使用用途から $\Phi 2.0\text{mm}$ 以下の小型電池であり、放射線に対して耐性をもつことが求められる。

最後に上記の結果をまとめて、考察を述べる。本研究では、治療中における腫瘍付近の照射線量を測定するリアル体内被曝線量計の開発を行なった。X 線検出器として CdTe 検出器を用いることで、無線で体外にデータを送ることで測定できる方式を考案した。無線によるデータ通信のほうは、半導体検出器からの信号を電力とする電池を使用しない無線方式、電池を使用して自発的にデータを送信する方式、誘導結合の RF-ID の原理による方式の 3 つの方式を提案した。半導体検出器からの信号を電力とする電池を使用しない無線方式は発生する電磁界が微弱で通信は不可能であるが、その他の 2 つについては通信可能であることを示した。しかし、本研究の通信方式 2. では、一対一のコイル結合の場合、電池を使用しなければならず、通信方式 1. に対する利点はない。また、今後の課題として、大きく 4 点残っている。1 点目は CdTe 検出器ではファントムを使用した状態での I-V コンバータのゲイン調節ならびに SNR の向上である。2 点目は小型電池は最低でも 6.6mW を 10 分以上供給でき、 $\Phi 2.0\text{mm}$ 以下の放射線に対して耐性をもつ電池が求められる。電池の開発上、電池自身の電解質、ケース、電極構造の技術的な課題が挙げられる。3 点は低消費電力の結果から A/D コンバータが 3.6mW と最も電力を消費するので、デジタル通信ではなくアナログ通信での検討を行なう必要がある。最後に体内に埋め込む回路の集積化が考えられる。課題は残っているものの、本研究によって体内線量計の実用化に一步進んだものと考えられる。

論文審査結果の要旨

放射線治療は近年、がん治療などにおいてますます重要になってきている。放射線治療は、身体の外から照射する外部照射法と、放射線を身体の内側又は身体の中から照射する小線源治療法に大きく分けられる。放射線治療においては、病巣部に十分な線量を投与する必要があるが、正常細胞への影響を考慮すると過剰に投与しないように抑える必要がある。現在、放射線治療においては、高い位置精度で照射が行われているが、実際に患部付近に照射されている線量は知らずに治療を行なっている。そのため、患部付近で直接、測定できる体内線量計が必要とされている。現在までに体内線量計としては次の3つの方法が考えられている。有線でデータを取り出す方式、シンチレーション光を用いた方式および電磁界の誘電現象を用いた無線方式である。この中で患者への負担、検出される信号強度の大きさの点から、本研究で検討されている電磁界の誘電現象を用いた無線方式が最も優れている。本研究ではリアルタイム体内線量計の開発として、検出器についての選択を行い、半導体検出器である CdTe 検出器が適当であることを示している。次に CdTe 検出器からの信号を身体の中から外へデータを送る方法として電磁界を媒体にした3つの無線方式を提案した。半導体検出器からの信号を電力とする電池を使用しない無線方式、電池を使用して自発的にデータを送信する方式を通信方式1、誘導結合の RF-ID システムの原理による方式を通信方式2として、体内線量計への適用性を調べた。本論文は、これらの研究結果をまとめたものであり、全編10章より成る。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、放射線治療における照射装置と一般的な線量計について述べている。

第3章では、体内線量計として CdTe 検出器の評価を行なった。CdTe 検出器と I-V 変換回路を用いることで、照射線量のリアルタイム測定は可能であることが明らかとなった。

第4章では CdTe 検出器からの信号を電力とする電池を使用しない無線方式の評価を行なった。その結果、データ通信は不可能であることを示した。

第5章では、通信搬送波の周波数設定では、通信方式1ならびに通信方式2において、135kHz 程度を搬送波周波数に設定することで、水の影響を無視できることを示している。

第6章では、本実験で作成したデジタル信号処理を行なう FPGA の作成を行なった。

第7章では、通信方式1の評価を行ない、通信方式1による線量計システムを確立した。

第8章では、通信方式2の評価を行ない、シミュレーションからデータ通信可能であることが明らかになった。しかし、リアルタイムでの電力供給は1対1のコイル結合では不足であることを示した。

第9章では、実用化への検討を行なっている。通信方式1ならびに通信方式2の体内に埋め込む回路の消費電力は6.6mW で、体内線量計の大きさも $\Phi 2.0\text{mm} \times 2.0\text{cm}$ に納まることを明らかにした。

第10章では、本研究で得られた結果ならびに課題について述べている。

以上、本研究では、放射線の医学応用として放射線治療用リアルタイム体内線量計の開発を行い、検出器として CdTe 検出器を用い、それで測定される線量を無線で体外にリアルタイムで送ることができる方式を考案したもので、量子エネルギー工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。